河西走廊水资源-生态环境-社会经济系统耦合关系及时空分异

张文睿[1]， 孙栋元[1]， 王亦可[1]， 杨 俊[2]， 兰立军[2]， 靳虎甲[2]， 徐 裕[2]

（1. 甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省水利厅水土保持中心，甘肃 兰州 730000）

摘 要：推进水资源、生态环境与社会经济系统协调发展为促进区域经济增长、社会进步和生态和谐与高质量发展提供技术支撑。文章基于修正耦合协调度模型评价河西走廊水资源-生态环境-社会经济系统耦合协调水平，运用灰色关联度模型和泰尔指数揭示驱动因素和空间异质性，并利用趋势面映射耦合协调度全域分布。结果表明：（1）由经济发展带动水资源-经济-生态系统综合发展水平逐年上升，综合发展指数由2006年0.29增长至2021年0.65。（2）河西走廊水资源子系统、经济子系统、生态子系统两两之间的耦合协调度呈不同趋势上升，水资源-生态-经济系统耦合度发展处于颉颃阶段向磨合阶段升级；协调度经历"轻度失调衰退-濒临失调衰退-勉强协调发展-初级协调发展-中级协调发展"五个阶段。（3）区域空间异质性逐渐发展为减小趋势，2021年空间分布表现出东南部发展优于西北部格局，金昌和张掖逐步成为河西发展优势区域。（4）城市化率、排污总量、节水灌溉面积对河西走廊水资源-生态环境-社会经济耦合发展起到较大的驱动作用。研究结果对河西走廊经济-生态-水资源系统协同发展具有一定的借鉴意义。

关键词：修正耦合协调模型；水资源-生态环境-社会经济系统；时空演变规律；驱动因素；河西走廊

水资源是支撑区域可持续发展的基础资源，同时具备社会经济和生态环境双重价值属性[1]，对推动经济增长和维持生态环境平衡发展起到至关重要的作用，合理利用水资源是实现地区宏观调控的前提。尤其对水资源匮乏的西北干旱地区，缓解水资源利用压力，实现水资源-生态环境-社会经济协同发展是亟待解决的首要问题。因此，协调水资源与社会经济和生态环境的矛盾关系已成为西北干旱区协调发展的关键所在。

河西走廊作为典型西北内陆干旱区，既是重要生态安全屏障带，又是"一带一路"建设重要区域，其生态地位优势明显。由于社会经济高速发展，对生态环境和水资源需求造成巨大压力，如何在经济高速发展、生态环境良好和高质量发展中保持水资源-生态环境-社会经济耦合协调发展是区域必须面对的关键基础科学问题。因此，开展河西走廊水资源-生态环境-社会经济耦合协调发展研究具有一定的必要性。关于水资源-生态环境-社会经济耦合协调研究方面，国内外学者针对不同流域[2]、区域[3]等空间尺度对系统间相互作用关系和响应过程方面开展了许多定性和定量研究，研究结果表明，我国有关耦合协调的研究选择研究区大多集中在经济较为发达的城市[4]，或者重点流域等，但是对于西北干旱区及经济资源、水资源发展欠缺的区域，相关探索较少。除此之外，以上关于研究耦合协调水平的研究所采用的环境库兹涅茨曲线[5]、非线性动力学模型、耦合度模型[6]、灰色关联度分析、空间回归模型[7]、ArcGIS重心模型[8]等方法也被广泛应用于自然地理、农业经济[9]、动力工程学、环境科学[10]、水利学等交叉学科。然而目前越来越多的学者关注到大多数关于耦合协调研究中，计算模型存在取值范围和阶段划分不清等问题，例如，彭红松等[11]

收稿日期：2023-10-28； **修订日期**：2023-12-19

基金项目：甘肃省高等学校青年博士基金项目（2022QB-070）；甘肃农业大学科技创新基金—青年导师扶持基金项目（GAU-QDFC-2021-16）；甘肃省重点研发计划项目（21YF5NA015）；甘肃省水利科学试验研究与技术推广项目（23GSLK092，23GSLK087）

作者简介：张文睿（2001-），女，硕士研究生，主要从事水文与水资源研究. E-mail: zhangwr@st.gsau.edu.cn

通讯作者：孙栋元. E-mail: sundy@gsau.edu.cn

通过综合多名学者关于耦合模型构建、系数确定等方面的研究成果，建议耦合协调度的取值范围和阶段划分需根据区域发展、资源环境承载力和关键胁迫因子的差异而定；丛晓男从理论的角度出发，探讨耦合度模型的形式与性质，纠正耦合度模型误用问题[12]。基于此，本文将复合系统修正耦合协调模型引入河西走廊水资源-生态环境-社会经济系统耦合协调研究，克服了耦合度使用效度问题，即厘清各子系统耦合度计算公式，解决传统计算模型中存在的混淆计算公式界定问题，使得耦合度尽可能分散分布于[0，1]之间的平均分布函数上，这样计算出的协调度可以更合理地表示耦合协调关系与发展水平的测度，运用该计算方法揭示河西走廊水资源-生态环境-社会经济耦合协调发展程度和时空分布规律，弥补河西走廊水资源-生态环境-社会经济系统耦合研究的薄弱和欠缺，为干旱内陆区水资源-经济社会-生态环境协调发展提供技术支撑。

文章选取2006—2021年河西走廊经济-水资源-生态系统的指标数据，基于修正耦合协调度模型、灰色关联度模型、泰尔指数及趋势面，解析水资源、经济社会和生态环境三大系统时空演变规律发展水平，计算子系统两两之间及三者之间的耦合协调状况，确定影响耦合发展的驱动因素，从全域分布角度量化分析耦合协调度空间演变规律，揭示水资源、生态和经济耦合协调发展机制，为河西走廊经济社会可持续高质量发展提供参考价值。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

河西走廊位于我国西北内陆地区，地理位置为93°20′~104°00′E，37°10′~42°50′N，面积27.6×10⁴ km²，形成狭长走廊[13]。该地区西接新疆，南临青海，北靠内蒙古并与蒙古国接壤。区域内地势呈南高北低，南部为祁连山脉，中部是石羊河、黑河、疏勒河等冲击形成的荒漠绿洲平原，北部为龙首山、合黎山等组成的断续山地[14]（图1）。由于地处内陆干旱区，河西走廊的气候特点主要表现为降水稀少、蒸发量大、温差大等。此气候条件对农业生产、生态环境和土地利用等产生了重要影响，区域内湿地资源丰富、类型多样，对涵养水源、保护生态环境具有重要作用。河西走廊行政区划包括酒泉、嘉峪关、张掖、金昌、武威5市4区15县，是甘肃省经济比较发达的灌溉农业区，也是西北地区最主要的商品粮基地和经济作物集中产区[15]。

1.2 数据来源与处理

选取2006—2021年的指标数据作为基础资料，其中水资源系统相关指标数据来自《甘肃省水资源公报》，生态和经济系统相关指标数据通过从《甘肃省人民政府国民经济和社会发展统计公报》和甘肃省经济社会发展统计数据库获取，部分数据通过间接计算得出，如城市化率、人均GDP、三产占比、第三产业占GDP比例、工业增加值和人均用水量。结合以上三处数据来源相互印证指标数据的合理性，进而构建水资源-生态环境-社会经济指标体系。

1.3 研究方法

1.3.1 指标体系标准化处理与权重计算 由于水资源-生态-经济系统之间存在复杂的动态关系，且两两子系统间也相互作用，形成水资源-生态（自然系统）、经济-生态（消费系统）、水资源-经济（生产系

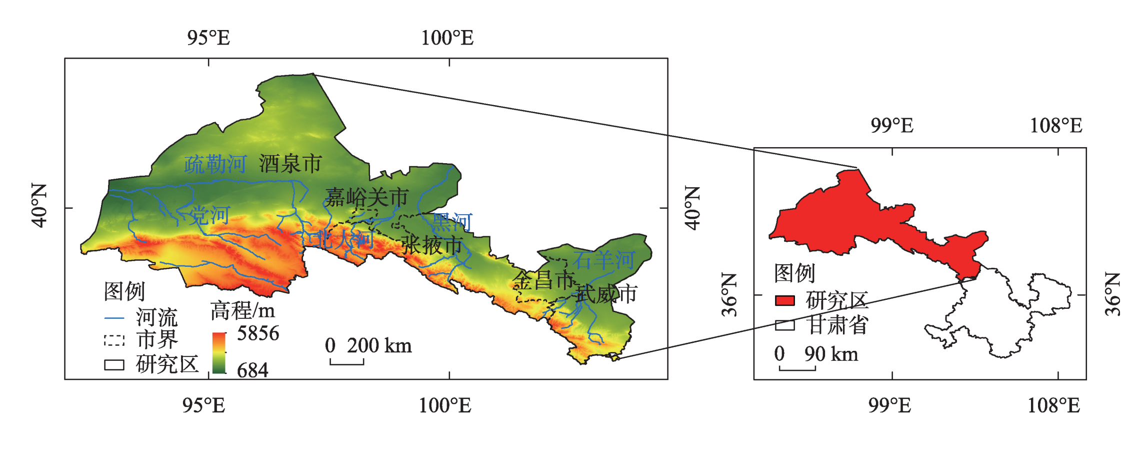


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

统)三个复合系统,故构建水资源-生态-经济系统的指标体系需要综合考虑选取可以反映正负反馈和系统发展的指标。文章根据指标体系构建科学性、系统性、可获得性原则,结合研究区实际情况,从社会发展、经济利用、生态保护、生态破坏、资源供给、资源利用六个方面制定23个指标(图2),采用极差标准化方法对数据进行标准化处理[16],依据变异系数法和层次分析法确定指标综合权重(表1),可以看出,在经济子系统中,相较于反映农业经济发展的指标权重而言,工业经济发展远大于农业经济;生态环境用水是促进生态发展的主要因素。

1.3.2　修正耦合协调度模型　采用加权线性综合法计算各子系统的综合评价指数[17]。计算公式为:

$$f(x)=\sum_{i=1}^{m}a_i x'_{ij} \tag{1}$$

$$g(y)=\sum_{i=1}^{m}b_i x'_{ij} \tag{2}$$

$$h(z)=\sum_{i=1}^{m}c_i x'_{ij} \tag{3}$$

式中:a_i、b_i、c_i分别表示各子系统中评价指标的权重;x'_{ij}表示标准化后的各指标的值;$f(x)$、$g(y)$、$h(z)$分别代表经济、生态、水资源系统的综合评价函数。将三个子系统的综合评价值进行比较分析,值越大说明该系统发展越好[18];反之,亦然。根据各子系统综合评价函数计算综合评价指数。计算公式为:

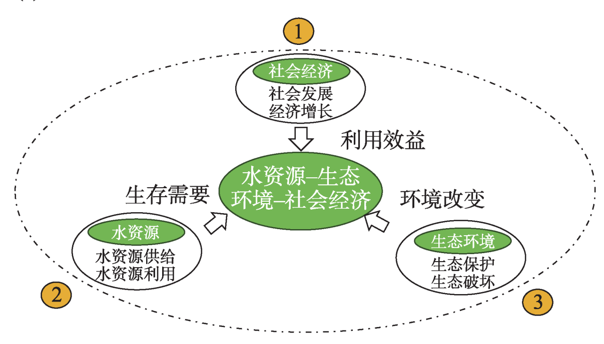
$$T=\alpha f(x)+\beta g(y)+\gamma h(z) \tag{4}$$

式中:T表示综合评价指数;α、β、γ分别表示经济、生态、水的待定系数,且$\alpha>0$、$\beta>0$、$\gamma>0$,$\alpha+\beta+\gamma=1$。待定系数是根据子系统对于综合评价的重要程度而确定,考虑到河西走廊各市发展侧重点不同,比如,金昌和嘉峪关社会经济侧重于工业,其余三市侧重于农业经济发展,故对用水和环境保护作用程度不统一。基于此,文章采用传统假设,即各子系统的重要性一致,对α、β、γ分别取值为1/3、1/3、1/3。

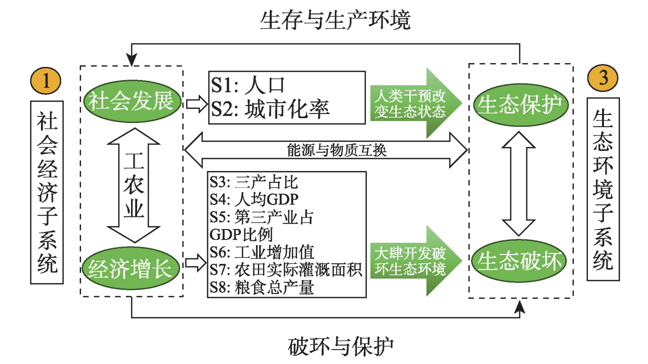
耦合度用于反映子系统间相互作用、相互影响的强弱程度;耦合协调度描述系统间协调发展水平[19],基于传统的耦合协调模型进行修正,采用修正后的耦合协调模型进行计算分析,其公式为[20]:

$$C=\sqrt{\left[1-\frac{\sqrt{(U_3-U_1)^2}+\sqrt{(U_2-U_1)^2}+\sqrt{(U_3-U_2)^2}}{3}\right]\times\sqrt{\frac{U_1}{U_3}\times\frac{U_2}{U_3}}} \tag{5}$$

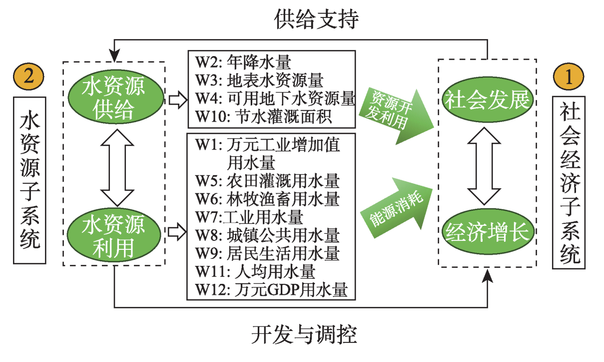
(a) 三个系统与复合系统之间的关系



(b) 消费系统(社会经济-生态环境)互馈关系



(c) 生产系统(水资源-社会经济)互馈关系



(d) 自然系统(水资源-生态环境)互馈关系

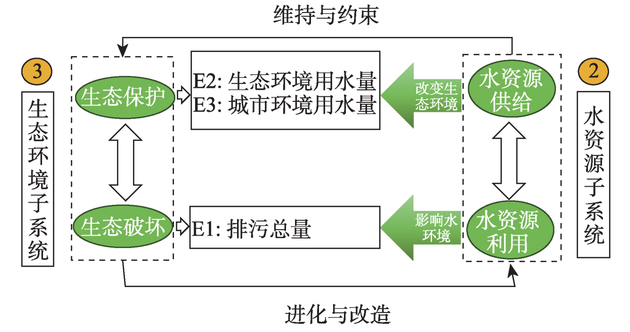


图2　耦合关系层次关联图

Fig. 2　Coupling relationship hierarchical correlation diagram

表1 指标体系构建

Tab. 1 Indicator system construction

目标层	指标层	指标属性	指标编号	变异系数法权重	层次分析法权重	综合权重
社会经济	人口/10^4人	+	S1	0.02	0.07	0.04
	城市化率/%	+	S2	0.06	0.11	0.09
	三产占比/%	+	S3	0.29	0.10	0.19
	人均GDP/10^4元	+	S4	0.17	0.12	0.15
	第三产业占GDP比例/%	+	S5	0.14	0.17	0.15
	工业增加值/10^8元	+	S6	0.17	0.15	0.16
	农田实际灌溉面积/hm^2	+	S7	0.06	0.13	0.10
	粮食总产量/10^4 t	+	S8	0.09	0.15	0.12
生态环境	排污总量/10^8 t	−	E1	0.07	0.16	0.12
	生态环境用水量/10^8 m^3	+	E2	0.46	0.54	0.50
	城市环境用水量/10^8 m^3	+	E3	0.47	0.30	0.38
水资源	万元工业增加值用水量/10^8 m^3	−	W1	0.10	0.08	0.09
	年降水量/mm	+	W2	0.04	0.09	0.06
	地表水供水量/10^8 m^3	+	W3	0.03	0.08	0.06
	地下水供水量/10^8 m^3	+	W4	0.09	0.08	0.08
	农田灌溉用水量/10^8 m^3	−	W5	0.03	0.09	0.06
	林牧渔畜用水量/10^8 m^3	−	W6	0.03	0.08	0.06
	工业用水量/10^8 m^3	−	W7	0.07	0.08	0.08
	城镇公共用水量/10^8 m^3	−	W8	0.07	0.08	0.08
	居民生活用水量/10^8 m^3	−	W9	0.07	0.09	0.08
	节水灌溉面积/hm^2	+	W10	0.05	0.08	0.06
	人均用水量/L	−	W11	0.17	0.09	0.13
	万元GDP用水量/m^3	−	W12	0.25	0.08	0.16

注:+表示正向指标,指标越高越好;−表示逆向指标,指标越低越好。

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{6}$$

式中:D为协调发展度;C为耦合度;U_i为第i个子系统的标准化值,假定$\max U_i = U_3$。将子系统的综合评价值进行比较分析,值越大说明该系统发展越好;反之,亦然。根据各子系统综合评价函数计算综合评价指数。耦合度等级划分标准和系统协调度的区间划分与协调发展评价标准见表2[21]。

1.3.3 *灰色关联度模型* 为了探究不同因素对城市耦合协调度的影响,选取灰色关联模型对城市耦合协调度驱动因素进行测度,以复合系统耦合协调度为母序列,以需要探究的驱动因素为特征序列[22]。

1.3.4 *泰尔指数* 泰尔指数用于研究城市耦合协调度的区域差异,计算公式为[23]:

$$TI = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{D_i}{\bar{D}} \times ln\frac{D_i}{\bar{D}}\right) \tag{7}$$

式中:N表示城市个数,D_i表示第i个城市复合系统耦合协调度,$\bar{D}$表示城市复合系统耦合协调度的平均值,TI为单调递增函数,TI越大说明耦合协调水

表2 系统耦合度与协调发展的区间划分评价标准

Tab. 2 Evaluation criteria for the interval division of system coupling degree and coordinated development

不可接受区间			可接受区间		
区间	协调发展度D评价	耦合度C评价	区间	协调发展度D评价	耦合度C评价
0~0.09	极度失调衰退	低水平耦合状态	0.50~0.59	勉强协调发展	磨合阶段
0.10~0.19	严重失调衰退		0.60~0.69	初级协调发展	
0.20~0.29	中度失调衰退		0.70~0.79	中级协调发展	
0.30~0.39	轻度失调衰退	颉颃阶段	0.80~0.89	良好协调发展	高水平耦合阶段
0.40~0.49	濒临失调衰退		0.90~1.00	优质协调发展	

平差异越大,反之则越小。

1.3.5 趋势面分析 以省会城市平面坐标为基础,建立耦合协调度趋势函数,利用ArcGIS趋势面模拟地区耦合协调度空间分异特征,模拟耦合协调度在全域空间格局的分布,从全域视角分析耦合协调度的演变趋势[24]。

2 结果与分析

2.1 子系统综合发展水平评价

从河西走廊水资源、生态、经济各子系统综合评价指数图可以看出(图3),三个子系统发展水平表现出经济优于水资源优于生态。2006—2021年水资源、经济和生态发展指数变化范围分别为0.06~0.87、0.01~0.69、0.27~0.76,可见经济发展变化速率最快,生态次之。综合发展水平在经济发展的带动下,2021年发展指数达到0.65。综合看出,河西走廊大部分地区处于生态系统滞后状态,以整个研究期时间尺度为对象,只有2020—2021年河西走廊大部分地区生态发展指数才突破0.5,大多时间集中在0.1~0.2之间,张掖市表现尤为显著,说明生态环境建设始终是河西走廊地区综合发展的短板。

2.2 修正耦合协调模型分析子系统间耦合协调度的分异特征

通过计算各子系统间的耦合协调度,绘制经济-生态、经济-水资源、水资源-生态、经济-水资源-生态系统耦合协调度三维图,如图4所示(图4a1~图4d1为耦合度,图4a2~图4d2为耦合协调度),从经济-生态系统耦合协调度(图4a1~图4a2)可知,2006—2021年河西走廊耦合平均水平分布在磨合阶段和颉颃阶段,但区域内两极分化形势严峻,尤其是嘉峪关市和张掖市分别出现极大值和极小值;2008—2013年各市均呈现不同程度的耦合度下降趋势,随后回升,2019—2021年耦合度跃升显著。2006—2021年协调度相对耦合度发展趋势较为稳定,表现为波动变优,且2019年以后发展迅速,与耦合度发展变化一致。从经济-水资源系统耦合协调度(图4b1~图4b2)可知,2006—2011年耦合度发展迅速,2011年达到峰值,全域耦合度处于磨合阶段,2019年稍有下降,随之回升。研究期内协调

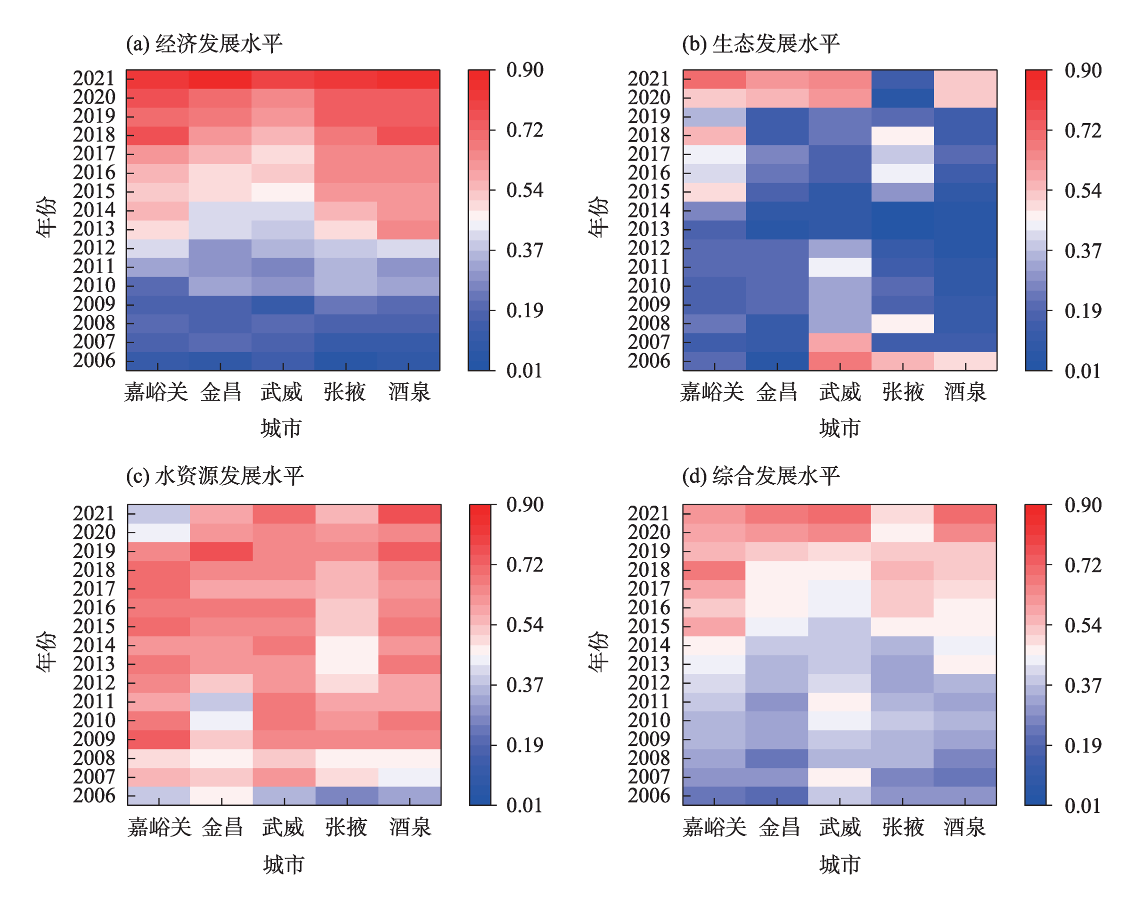
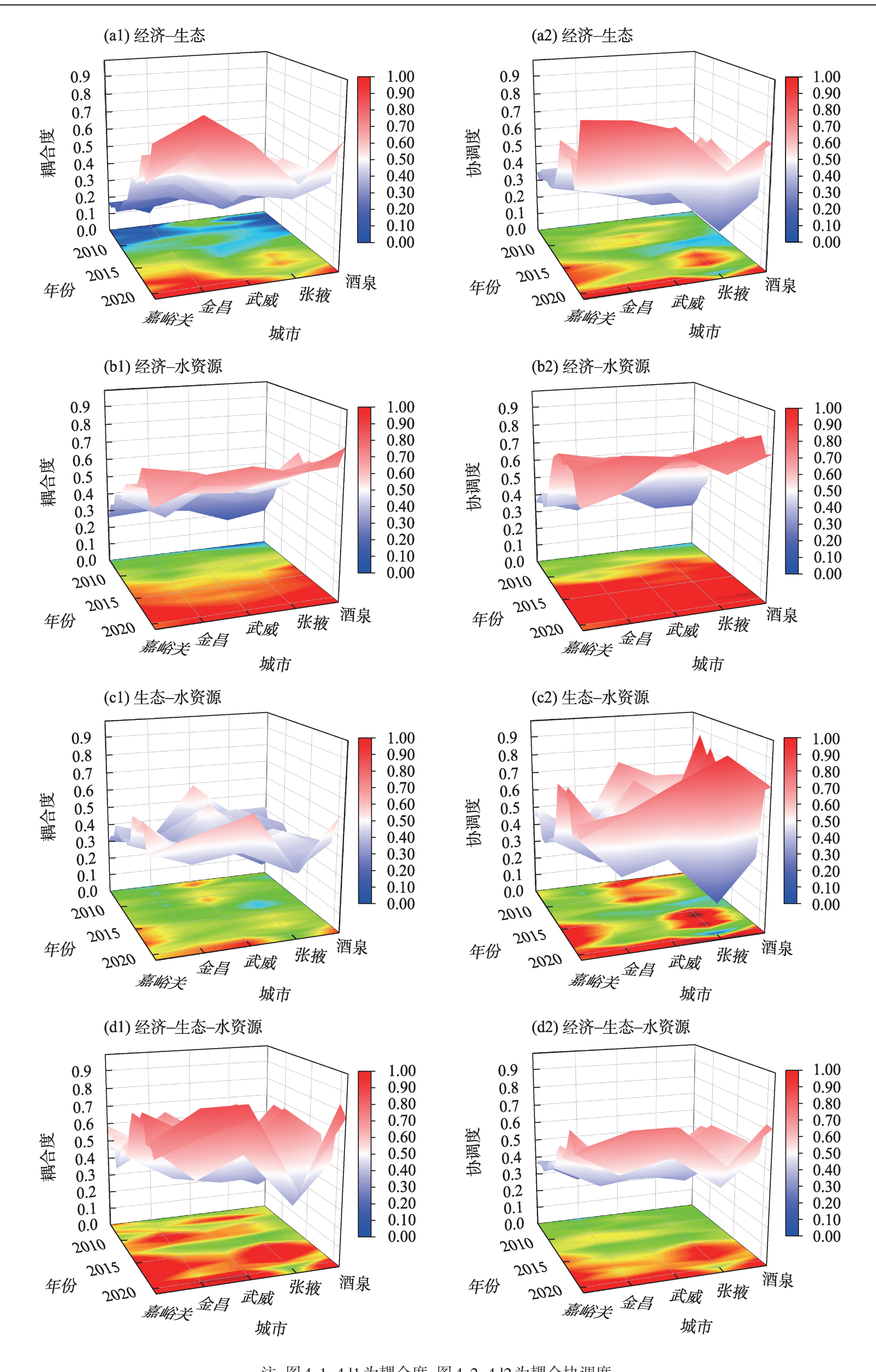


图3 河西走廊水资源-社会经济-生态综合评价指数

Fig. 3 Water resources-social economy-ecological comprehensive evaluation index of Hexi Corridor



注:图4a1~4d1为耦合度;图4a2~4d2为耦合协调度。

图4 河西走廊水资源-社会经济-生态子系统间的耦合协调度

Fig. 4 Coupling coordination degree among water resources-social economy-ecology subsystems in Hexi Corridor

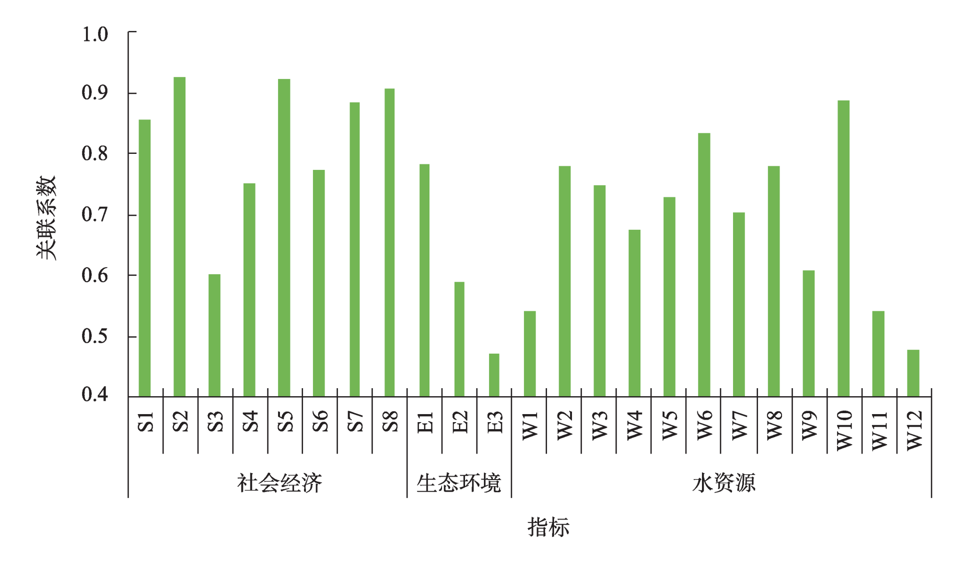
度与耦合度演变趋势一致。说明各市响应经济高质量发展政策，提高了水资源利用效率。从水资源-生态系统耦合协调度(图4c1~图4c2)可知，全域在研究期间发展上下波动较大，其中酒泉市耦合度、协调度均呈U型发展；张掖市和金昌市耦合度、协调度均呈M型发展；武威市和嘉峪关耦合度、协调度均呈S型发展，研究期间耦合协调整体变化不大。值得注意的是，水资源-生态系统和经济-水资源系统均反映出武威市2014年耦合协调度下降，究其原因为2014年甘肃省出台《甘肃省石羊河流域地下水资源管理办法》严格管控可用地下水资源量。由经济-水资源-生态系统耦合协调度(图4d1~图4d2)可知，耦合度由2006年0.33~0.59发展到2021年0.42~0.81，总体耦合变优速度缓慢，磨合阶段占总耦合水平的51.25%，高水平耦合阶段占总耦合水平的7.5%，其余均为颉颃阶段。耦合协调度16 a来经历了“轻度失调衰退-濒临失调衰退-勉强协调发展-初级协调发展-中级协调发展”五个阶段，跨度较大。

2.3　灰色关联度分析驱动因子

采用灰色关联度模型计算驱动因素关联系数可以看出(图5)，影响较大指标分别为：经济系统中S2(城市化率)、生态系统中E1(排污总量)、水资源系统中W10(节水灌溉面积)，其中经济系统作为主要复合系统耦合驱动系统。说明经济发展的侧重点在于社会发展，治理生态环境的主要措施为制约破坏生态系统行为，促进节水灌溉发展是确保水资源合理利用的有效途径。

2.4　耦合协调度时空演变规律

由河西走廊水资源-生态-经济系统耦合协调度空间分异表可知(表3)，2006—2014年空间分异性表现出先减小后增加趋势，2015年以后呈现波动变化，研究期间泰尔指数小于0.01发生在2007—2013年、2016—2017年、2019—2021年，最小值发生在2019年，整体来看从2006—2021年泰尔系数下降了0.0052，说明2021年相较于其他年份表现出明显的减小空间异质性变化。由于研究期横跨“十一五”“十二五”“十三五”三个时期，受相关政策影响，在间隔年处耦合协调水平相应发生了阶段性转变。以2006年、2011年、2016年、2021年为间隔点，可以从四个时间段看出河西走廊耦合协调度逐步变优，从2006年0.34增长到2021年0.70，结合图4d2各时期耦合协调度空间排序为：2006年，金昌>张掖>嘉峪关=武威>酒泉，2011年，酒泉>张掖>嘉峪关>武威>金昌，2016年，金昌>武威>酒泉>嘉峪关>张掖，2021年，张掖>嘉峪关>酒泉>武威>金昌。2016年表现为西部发展优于东部，2021年逐渐演变为东部发展优于西部。采用趋势面分析拟合耦合协调度全域分布图可知(图6)，2006—2021年河西走廊水资源-生态-经济系统耦合协调度趋势面南北方向拟合曲线斜率大于东西方向，即南北方向为水资源-生态-经济系统耦合协调度产生空间分异



注：图中指标编号的含义参见表1。

图5　河西走廊复合系统驱动因素关联系数

Fig. 5　Chord of coupling coordination degree and driver correlation degree of Hexi Corridor composite system

表3 河西走廊水资源-生态-社会经济系统耦合协调度空间分异

Tab. 3 Spatial differentiation of the coupling coordination degree of water resources-ecology- social economic system in five cities of the Hexi Corridor

年份	耦合协调度	泰尔指数	年份	耦合协调度	泰尔指数
2006年	0.34	0.0119	2014年	0.43	0.0151
2007年	0.38	0.0058	2015年	0.50	0.0122
2008年	0.37	0.0050	2016年	0.56	0.0067
2009年	0.36	0.0037	2017年	0.60	0.0038
2010年	0.42	0.0050	2018年	0.61	0.0138
2011年	0.45	0.0080	2019年	0.58	0.0024
2012年	0.45	0.0046	2020年	0.65	0.0188
2013年	0.38	0.0093	2021年	0.70	0.0067

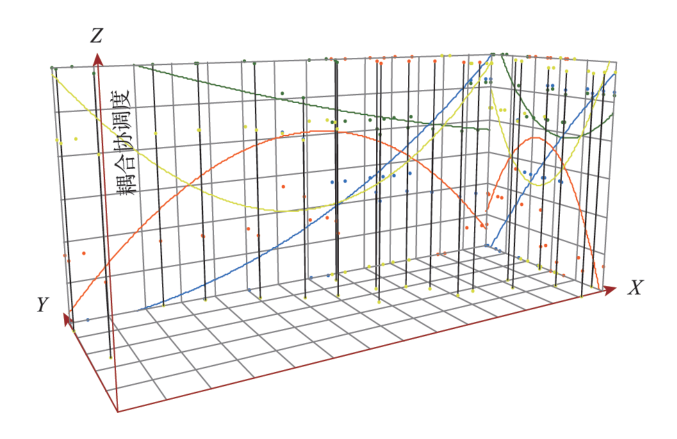


图6 河西走廊水资源-生态-经济系统耦合协调度全域分析

Fig. 6 Trend surface analysis of coupled coordination degree of waterresources-ecology-economic system in Hexi Corridor

的主要方向。具体来看，东西方向和南北方向的发展模式一致，均表现为由“U”型转向“一”字型到倒“U”型再到“U”型的变化的态势，2006—2011年变化趋势不明显。由“U”型谷峰点可以看出，水资源-生态-经济系统耦合协调度属性最高值逐步向张掖市和金昌市偏移，河西走廊东南部地区逐渐演化为水资源-生态-经济系统耦合协调度发展的优势区域。

3 讨 论

本文采用修正后的耦合协调模型重点探讨了河西走廊2006—2021年经济、生态和水资源发展水平及复合系统综合发展水平，厘清了生态是制约综合发展水平的主要短板，并研究了经济-生态、经济-水资源、水资源-生态和经济-生态-水资源4个层面的时空演变视角特征规律，客观揭示了两两系统及复合系统之间的内在联系，把握整个研究期及“十一五”“十二五”“十三五”时间节点空间演变规律，对制定水资源管理办法和地区发展策略具有重要的科学价值。

通过研究综合发展水平和驱动因素得出河西走廊复合系统协调发展主要靠经济带动，然而地区高质量发展建设过程中，更需要将资源环境融入其中，达到子系统协调互促效果，相关研究[25]也表明未来西北干旱区在极端气候水文事件强度加大的背景下，需要进一步挖掘水资源潜力，加大生态保护修复力度，以应对气候变化可能带来的风险，进而维持可持续发展。经过了解目前国内计算系统耦合协调模型发现传统的模型有的借鉴物理学中的容量耦合概念和容量耦合系数模型来构建计算模型[26]，有的考虑利用降维思想评价地区可持续发展能力[27]。虽然计算实质均是将各指标的原数据进行标准化处理，然后与权重相乘，但是每个模型中对权重的确定又各不相同，运用到的计算模型系数各异，导致耦合度不能在[0，1]区间上均匀分布。故文章采用修正后的耦合协调模型进行分析，得出河西走廊复合系统协调升级速度相对较慢，以及空间差异性逐步缩小，此结论与高泽阳等[28]关于河西走廊经济社会与资源环境协调发展的研究结论相符，进一步验证了修正耦合模型的可行性。针对文章研究结果发现河西走廊耦合协调度在时空演变上存在明显的波动性，其原因是生态经济指标受相关政策影响产生波动变化，各指标数据的稳定性较差，在今后的研究中，可进一步细化系统指标。同时由于数据获取受限，后续研究中进一步从县域尺度进行微观分析，借助大数据进行更为系统科学的探讨，并对未来年的耦合发展水平进行预测。

4 结 论

本文以河西走廊作为研究对象,分析2006—2021年酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市和武威市社会经济-生态环境-水资源耦合协调度时间变化情况,及其耦合度的影响因子及空间演变格局,得出如下结论:

(1) 河西走廊社会经济-生态环境-水资源系统综合发展指数逐年上升,其中,经济发展变化速率最快,水资源、生态系统综合发展水平较低。

(2) 河西走廊社会经济-生态环境-水资源耦合度变优速度缓慢,经济-生态系统在2006—2021年处于磨合阶段和颉颃阶段;经济-水资源系统在2011年全域耦合度处于磨合阶段,处于"勉强协调-中级协调"发展;水资源-生态系统协调度横跨"轻度失调衰退-濒临失调衰退-勉强协调发展-初级协调发展-中级协调发展"五个阶段,两极分化严重。

(3) 2006—2021年河西走廊社会经济-生态环境-水资源系统空间异质性总体减小,2021年耦合协调度呈现出"东南部优于西北部"的空间格局。从全域上看,目前研究区耦合协调发展优势区在金昌和张掖。

(4) 经济系统对整个系统耦合度影响最大,其中城市化率、排污总量、节水灌溉面积分别作为驱动经济系统、生态系统和水资源系统发展的关键因素。

参考文献(References):

[1] 张恬姿, 王小军, 齐广平, 等. 甘肃省水资源-经济社会-生态环境耦合协调驱动因素研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 38-46. [Zhang Tianzi, Wang Xiaojun, Qi Guangping, et al. Driving factors of water resources-economic society-ecological environment coupling in Gansu Province[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(3): 38-46.]

[2] 吴青松, 马军霞, 左其亭, 等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 55-62. [Wu Qingsong, Ma Junxia, Zuo Qiting, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 55-62.]

[3] 刘科, 韩路, 范聪喆. 关中地区水资源-社会经济-生态系统耦合协调发展评价[J]. 水利建设与管理, 2023, 43(11): 6-12, 16. [Liu Ke, Han Lu, Fan Congzhe. Assessment of the coordinated and coupling development of water resources, social economy and ecology system in Guanzhong region[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2023, 43(11): 6-12, 16.]

[4] 袁汝华, 臧艳秋. 长江经济带经济发展与水资源环境耦合协调性实证分析[J]. 水利经济, 2021, 39(2): 1-8. [Yuan Ruhua, Zang Yanqiu. Empirical analysis of coupling and coordination between economic development and water resource environment in Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021, 39(2): 1-8.]

[5] 王西琴, 何芬, 张兵. 丽江市经济发展与环境污染水平的关系[J]. 地理研究, 2010, 29(5): 927-934. [Wang Xiqin, He Fen, Zhang Bing. Study on the relationship between economic growth and environmental degradation of Lijiang City[J]. Geographical Research, 2010, 29(5): 927-934.]

[6] 黄松, 李燕林, 李如友. 桂西地区地质遗迹与民族文化资源的空间关系及成因机理[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1434-1448. [Huang Song, Li Yanlin, Li Ruyou. Spatial relationship and formation mechanism of geological relics and ethnic cultural resources in western Guangxi, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1434-1448.]

[7] 牟宇峰, 孙伟, 袁丰, 等. 长江三角洲地区产业演变的就业响应研究[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(2): 60-65. [Mu Yufeng, Sun Wei, Yuan Feng, et al. Research on employment response to industrial evolution in the Yangtze River Delta[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(2): 60-65.]

[8] 谢保鹏, 陈英, 白志远, 等. 甘肃省县区单元城镇工矿用地与二三产业耦合状态的时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 18-25. [Xie Baopeng, Chen Ying, Bai Zhiyuan, et al. Spatio-temporal changes of coupling between industrial land and secondary & service industries of Gansu's counties[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 18-25.]

[9] 冯俊华, 张路路, 唐萌. 农业经济—生态—社会复合系统耦合协调发展研究——以陕西省为例[J]. 系统科学学报, 2021, 29(3): 92-96. [Feng Junhua, Zhang Lulu, Tang Meng. Research on coupling coordination in Ecology-economy-society system: Taking Shaanxi Pro-vince as an example[J]. Journal of Systems Science, 2021, 29(3): 92-96.]

[10] Zhang Yu, Zhu Taoxing, Guo Haiyan, et al. Analysis of the coupling coordination degree of the Society-Economy-Resource-Environment system in urban areas: Case study of the Jingjingji urban agglomeration, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109851.

[11] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J]. 资源科学, 2020, 42(4): 593-606. [Peng Hongsong, Guo Lijia, Zhang Jinhe, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource-environmental pressure[J]. Resources Science, 2020, 42(4): 593-606.]

[12] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用[J]. 经济地理, 2019, 39(4): 18-25. [Cong Xiaonan. Expression and

mathematical property of poupling model, and its misuse in geographical science[J]. Economic Geography, 2019, 39(4): 18-25.]

[13] 赵文智, 任珩, 杜军, 等. 河西走廊绿洲生态建设和农业发展的若干思考与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 424-434. [Zhao Wenzhi, Ren Heng, Du Jun, et al. Thoughts and suggestions on oasis ecological construction and agricultural development in Hexi Corridor[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 424-434.]

[14] 王新源, 刘世增, 陈翔舜, 等. 河西走廊绿洲面积动态及其驱动因素[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 212-219. [Wang Xinyuan, Liu Shizeng, Chen Xiangshun, et al. Dynamic changes and driving factors of oasis in Hexi Corridor[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 212-219.]

[15] 赵雪雁. 甘肃省经济发展与环境质量的交互耦合关系[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(6): 1-7. [Zhao Xueyan. Analysis on coupling relationship between economic development and environmental quality in Gansu[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(6): 1-7.]

[16] 秦东丽, 陈屹德. 基于"PSR-EES"模型的江苏省旅游生态安全研究[J]. 南阳师范学院学报, 2019, 18(6): 10-16. [Qin Dongli, Chen Yide. Research on Jiangsu Province tourism ecological security based on PSR-EES model[J]. Journal of Nanyang Normal University, 2019, 18(6): 10-16.]

[17] 王重玲, 韩莉, 朱志玲. 宁夏新型城镇化与人居环境发展时空耦合关系分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(26): 83-89. [Wang Chongling, Han Li, Zhu Zhiling. Space-time coupling of new-type urbanization and human settlement development[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(26): 83-89.]

[18] 白爱桃, 叶得明. 西北干旱区人口农业经济—生态耦合协调态势分析——以甘肃省民勤县为例[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(1): 54-58. [Bai Aitao, Ye Deming. Analysis of coupling coordination situation among population-agricultural Economy-Ecology in Northwest arid areas: Taking Minqin county of Gansu Province as an example[J]. Resource Development & Market, 2017, 33(1): 54-58.]

[19] 吴玥葶, 郭利丹, 井沛然, 等. 中亚五国水-能源-粮食-生态耦合关系及时空分异[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 573-582. [Wu Yueting, Guo Lidan, Jing Peiran, et al. Coupling relationship and spatiotemporal differentiation of the water-energy-food-ecology nexus in five Central Asian countries[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 573-582.]

[20] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810. [Wang Shujia, Kong Wei, Ren Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810.]

[21] 张妍, 吴玉洁. 基于耦合模型的产业结构与生态环境的协调发展研究——以陕西省商洛市为例[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(23): 196-200. [Zhang Yan, Wu Yujie. Research on the coordinated development of industrial structure and ecological environment based on coupling model: Taking Shangluo City in Shaanxi Province as an example[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(23): 196-200.]

[22] 张玉春, 于鹏生, 任剑翔. 甘肃省产业结构与经济增长的灰色关联分析[J]. 中国管理信息化, 2011, 14(16): 55-57. [Zhang Yuchun, Yu Pengsheng, Ren Jianxiang. Grey correlation analysis between industrial structure and economic growth in Gansu Province[J]. China Management Informationization, 2011, 14(16): 55-57.]

[23] 李岚, 樊瑞博, 谈存峰. 农业高质量发展时空演化与区域差异——基于甘肃省14市州的实证分析[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2024, 18(4): 52-58. [Li Lan, Fan Ruibo, Tan Cunfeng. Temporal and spatial evolution and regional differences of high-quality agricultural development: Based on the empirical analysis of 14 cities in Gansu Province[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science), 2024, 18(4): 52-58.]

[24] 陈述, 纪勤, 颜克胜, 等. 长江流域水资源—经济—生态系统的耦合协调及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 28-36. [Chen Shu, Ji Qin, Yan Kesheng, et al. Coupling coordination and influencing factors of water-economy-ecosystem in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2023, 34(3): 28-36.]

[25] 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385-393. [Chen Yaning, Li Zongqin, Xu Jianhua, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of Northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385-393.]

[26] 黄晓楠, 张目. 中国省域生态文明建设与金融集聚耦合协调发展研究[J]. 林业经济, 2020, 42(4): 34-45. [Huang Xiaonan, Zhang Mu. Study on the coupling coordinated development between China's provincial ecological civilization construction and financial agglomeration[J]. Forestry Economics, 2020, 42(4): 34-45.]

[27] 董燕红, 钟定胜, 卢小丽. 主成分与层次分析法在区域可持续发展能力评价中的应用对比[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 359-365. [Dong Yanhong, Zhong Dingsheng, Lu Xiaoli. Comparative study of the application of PCA and AHP to the analysis and evaluation of the regional sustainable development[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 359-365.]

[28] 高泽阳, 常跟应. 中国干旱区城市经济社会与资源环境协调发展研究——以河西走廊5市为例[J]. 复旦学报(自然科学版), 2021, 60(4): 515-523. [Gao Zeyang, Chang Genying. Research on the harmonious development of social economy, resources and environment in arid regions of China: A case study of 5 cities in Hexi Corridor[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2021, 60(4): 515-523.]

Coupling relationship and spatiao-temporal differentiation of the water resources-ecological environment-social economic system in the Hexi Corridor

ZHANG Wenrui[1], SUN Dongyuan[1], WANG Yike[1], YANG Jun[2],
LAN Lijun[2], JIN Hujia[2], XU Yu[2]

(1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Soil and Water Conservation Center of Gansu Provincial Department of Water Resources, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Promoting the coordinated development of water resources, the ecological environment, and the socioeconomic system provides technical support for enhancing regional economic growth, social progress, ecological harmony, and high-quality development. Based on the modified coupling coordination degree model, this paper evaluated the coupling coordination level of water resources-ecological environment-social economic system in the Hexi Corridor. The gray correlation degree model and Theil index were used to identify the driving factors and spatial heterogeneity. The trend surface was utilized to map the global distribution of the coupling coordination degree. The results showed that: (1) The comprehensive development level of water resources-economy-ecosystem driven by economic development increased every year, and the comprehensive development index enhanced from 0.29 in 2006 to 0.65 in 2021. (2) The coupling coordination degree between the water resources, economic, and ecological subsystems in the Hexi Corridor showed different trends, and the development of the coupling degree of the water resources-ecology-economy system was upgraded from the antagonistic to the running-in stage. The coordination degree experienced five stages of "mild imbalance recession-on the verge of imbalance recession-reluctant coordinated development-primary coordinated development-intermediate coordinated development". (3) The spatial heterogeneity in the region first increased and then decreased. The spatial distribution revealed that the development of the southeast was better than that of the northwest. Jinchang and Zhangye have gradually become the dominant areas of development in Hexi. (4) Urbanization rate, total pollutant discharge, and water-saving irrigation areas played a remarkable role in driving the coupling development of water resources-ecological environment-social economy in the Hexi Corridor. These results have a certain reference-related significance for the coordinated development of the economy-ecology-water resources system in the five cities of the Hexi Corridor.

Keywords: modified coupling coordination model; water resources-ecological environment-social economic system; spatio-temporal change features; driving factors; Hexi Corridor